

自動拋光系統之研發-子計畫二：
自動拋光系統中碎形拋光路徑與三維表面形貌之研究
**Research on Fractal Finishing Paths and 3-D Surface Topography
for Automated Surface Finishing Systems**

計畫編號：NSC88-2212-E-032-013

執行期間：87 年 8 月 1 日至 88 年 7 月 31 日

計畫主持人：陳昭彰 博士

共同主持人：楊智旭 博士

執行單位：淡江大學機械系

一、中文摘要（關鍵字：磨拋自動化、碎形路徑、模糊控制、表面粗糙度）

本研究的目的是在於試著尋找適合模具磨拋加工之自動化路徑，應用碎形的目的是因為碎形路徑具有「方向性的均勻分佈」，符合實際磨拋加工所需。由於傳統磨拋路徑如往復式（ZigZag）路徑在 X 方向、 Y 方向路徑的總長度比例非常不均勻，因此在本研究中採用「 \square 」pattern 為碎形基本模式，進而發展出倒角型碎形路徑及圓弧碎形路徑，並經由先前發展的模具自動磨拋系統進行實作驗證各種碎形路徑的磨拋效果，最後嘗試以模糊控制（Fuzzy Control）方式，對不同曲面及加工面表面形貌情況，找出最適用碎形加工路徑。

英文摘要（Keywords: Automated surface finishing, Fractal toolpaths, Fuzzy control, Surface Roughness—

This paper is to generate and to investigate the appropriate surface finishing toolpaths that is suitable to be used in automated surface finishing processes of dies and molds. Previous studies have shown the advantages of directional distribution characteristics of fractal toolpaths for surface finishing processes. Three fractal paths: “ \square ” pattern, Chamfer pattern, and arc pattern have been developed for 2-D and 3-D surface finishing paths and also verified by experimented results using the prototype ASFS. Final approach is to investigate the possibility of using fuzzy control logic to develop fuzzy fractal toolpaths for emulating human operations based on the surface curvatures and related requirements.

二、計畫緣由與目的

本研究的目的是在於試著尋找適合模具磨拋加工之自動化路徑，應用碎形的目的是因為碎形路徑具有「方向性的均勻分佈」，符合實際磨拋加工所需。1970 年 Benoit Mandelboit 提出“碎形”這個名詞[1]，並發展出“碎形幾何學”。碎形的基本特徵包括自我相似性、可再分割性及運用電腦語言中的程序演算法來建構碎形幾何。1994 年 Jordan J. Cox 等在 B'ezier 曲面發展具佈滿空間性質（Space-filling）的曲線模式，應用於加工路徑上，並比較各路徑模式的加工特性[2]。J. G. Griffiths 則將 Hilbert curve 建立在 B'ezier 曲面，並藉以在複雜曲面上規劃有效率的刀具路徑[3]。CHEN 首先在 B-spline 曲面上產生碎形路徑，同時也與表面形貌整合[4]，另外 CHEN 等發展四種— \square pattern、倒角路徑、圓弧路徑及 Mooris' curve[5]，並比較三種往復式路徑，有 X 方向、 X - Y 方向及 45 度角方向，表面粗度量測是在水平方向（ X ）、垂直方向（ Y ）、及 45 度角方向（ U ）三個方向的表面粗糙度相加，以作為評估磨拋路徑的方法，其值越小者，代表其路徑越均勻，加工表面越佳[6, 7]。1965 年 Zadeh 教授提出 Fuzzy 集合，1968 年提出模糊演算法，1970 年模糊理論作意思辨明時思考模式之提案（Bellmand & Zadeh），至此，Fuzzy 模型離型建立，1973 年 Fuzzy 推論之提案（Zadeh），1980 年 Fuzzy 控制的實用於水泥旋窯控制的實用化（F.L. Smidth company），從文獻資料[8~11]得知，模糊邏輯（Fuzzy logic）的控制理論可廣泛的被應用到機械製程加工中。Chen[8]在 1991 年提出利用模糊邏輯理論（Fuzzy logic theory）來建立表面研磨的輔助控制系統。Nakajima 等[9]在 1992 年建立智慧型的研磨加工自動控制系統，可以在即時（real-time）的條件下偵測研磨加工參數，利用模糊邏輯理論提供較佳的加工條件，以求得更好的加工品質。

三、碎形磨拋路徑之評估

3.1 碎形磨拋路徑

圖一為“門” pattern、倒角及圓弧碎形路徑碎形路徑的磨拋路徑圖。2-D 加工時，可利用此資料點畫出產生的圖形，再將此資料點輸入 NC 工具機中，磨拋出所產生的碎形路徑。3-D 加工時則以 B-spline 曲面表示，再將原碎形路徑資料點轉至曲面，產生 3-D 的碎形磨拋路徑，如圖二所示。

本研究對於各種碎形路徑及往復式路徑的表面粗度量測是在水平方向 (X)、垂直方向 (Y)、及 45 度角方向 (U) 三個方向上，每一方向分別平均取三個位置進行量測表面粗度 R_{max} 值，然後將三個不同方向中所量測的 R_{max} 最大值相加，以作為評估磨拋路徑的方法，其值越小者，代表其路徑越均勻，加工表面越佳。即

$$R_{max}(X) + R_{max}(Y) + R_{max}(U) = R_{max}(T)$$

$R_{max}(X)$ 、 $R_{max}(Y)$ 、 $R_{max}(U)$ 分別是指 X 方向、Y 方向及 U 方向中平均取三個位置量測中最大的 R_{max} 值， $R_{max}(T)$ 為總和表面粗度值。

對於表面粗度 R_{max} 值的估算，可由先前研究 [] 中碎形階數刀具半徑曲率半徑與加工後表面殘留的貝丘高度之相關式得知，

$$\text{一般平面: } h = r - \sqrt{r^2 - \left(\frac{H}{2^{K+2}}\right)^2}; \quad (1)$$

規則凸面:

$$h = R - (R - r) \sqrt{1 - \left(\frac{H}{2^{K+2}R}\right)^2} - \sqrt{r^2 - \left[\frac{(R-r)H}{2^{K+2}R}\right]^2}; \quad (2)$$

規則凹面:

$$h = (R + r) \sqrt{1 - \left(\frac{H}{2^{K+2}R}\right)^2} - \sqrt{r^2 - \left[\frac{(R+r)H}{2^{K+2}R}\right]^2} - R \quad (3)$$

3.2 碎形磨拋路徑實作驗證

本實驗利用手持電動研磨機夾持圓球形帶柄砂輪於 VCENTER 65 綜合加工機進行磨拋實驗，而在電動研磨機夾持部份，由先前發展的自動磨拋系統 [6] 中研發之夾持具，如圖三所示，圖四為 3-D 碎形路徑實作。另 2-D 實作工件材料為 SS41，磨拋工具為 #120 球型 $\phi 15$ mm 氧化鋁帶柄砂輪，進給率 80 mm/min，轉速 16000rpm 及磨拋深度 0.10 mm，碎形路徑確可使加工面紋路達到「方向性的均勻分佈」。

四、Fuzzy 碎形路徑

圖五為模糊控制器主要基本架構，各部分作用簡述如下：

1. 模糊化介面 (Fuzzification Interface) 此一介面主要功能，在將輸入變數的值，並將明確的輸入變數 (Crisp Input Value) 轉換成模糊系統的語言數值 (Linguistic Value)，以完成模糊

化的過程。

2. 資料庫 (Data Base) 提供模糊化所用之歸屬函數 (Membership Function) 之各種定義資料，包括各種語言變數之定義。
3. 模糊規則庫 (Rule Base) 提供模糊邏輯系統所使用之模糊規則，提供定義，其中可能包括各種的語言邏輯，以人類思考模式的近似原理為推論方式，而形式以 IF.....THEN..... 表達。
4. 決策單元 (Decision Making Unit) 或模糊的推論機 (Fuzzy Inference Mechanism) 是模糊邏輯系統的主要機構，亦是整個系統的中心，主要目的為將給定的模糊邏輯運算子和輸入值推論，求得模糊輸出值，也就是系統決策機構。
5. 解模糊化介面 (Defuzzification Interface) 將模糊數值 (Fuzzy Value) 輸出轉成明確值 (Crisp Value)，亦是將人為思考模式的行為，化為機械所能執行的 I/O 模式，是模糊集合和明確集合的一種轉換。

由公式 (1-3) 可知工件曲面曲率半徑 R，假設

(1)、工具半徑 $r \leq \min R$ ，所需的 R 為磨拋工具驅動面 (drive surface) 上磨拋點的曲率半徑，由於曲面在不同方向剖面可求得不同曲率半徑，其中最大和最小曲率半徑為主曲率半徑，因此磨拋工具半徑需小於或等於最小曲率半徑，才能真正對曲面進行磨拋。

(2)、工件形狀為方形或矩形，且 H 為最小邊長

(3)、所需磨拋後貝丘高度 h，或 $R_{max} < h < r$

模糊控制器輸入端為工件曲率半徑 R、工件邊長 H、工具半徑 r、需求 R_{max} (h)，輸入端為 K (碎形路徑階數)。其中工件曲率半徑 R 為 (-1, 1)，凹面為負數，凸面為正數。因模糊控制規則 (Rule) 需更進一步實驗了解相互關係係數設計，尤其游離磨料拋光加工部份，因此本研究針對游離磨料拋光加工以田口方法進行實驗，才能完全解決模糊控制規則。

五、游離磨料實驗與結果討論

5.1 游離磨料之實驗設計

先前實驗是以圓球形帶柄砂輪的研磨為主來評估碎形磨拋路徑，此次實驗是針對使用銅環的游離磨料 (如圖六所示) 研光，並以田口方法進行實驗，探討以下因素對工件磨拋後表面粗度之影響：(1) 碎形路徑 (3 階，30 mm×30 mm) (2) 靜態預壓 (3) 進給率 (4) 工具轉速，作為田口實驗之變動參數。在研光壓力設定方式，是將實驗用鋼材置於電子秤上，讀取電子秤之讀數，再利用圖三之自動化磨拋系統在工具機上進行實驗。圖七為碎形磨拋後工件。

碎形磨拋路徑加工實驗步驟如下：

1. 使用 NAK80 合金工具鋼，硬度約 HRC38-42 之間，表面粗度值約 $R_{max} 2.3 \mu m$ ($Ra 0.3 \mu m$)。
2. 根據研光前工件的表面粗度值 $Ra 0.3 \mu m$ ，使用 30 μm 之鑽石膏，加稀釋液進行研光。

3. 使用內半徑 3 mm，外半徑 4 mm 之銅環。

4. 研光時間以一次碎形路徑之長度為主。

配合田口式品質管制的參數設計法及前述的考量，我們採用表二的直交表為 $L_9 3^4$ 型的直交表及望小特性。

5.2 結果討論

游離磨料實驗結果如表三和表四所示，以及實驗過程之觀察，以下針對銅環的研光參數對表面粗度的影響進行討論：

1. 對於銅環之研光路徑來說，路徑愈均勻則會得到較好之表面粗度，由本實驗結果顯示，三種碎形路徑對銅環研光後的表面粗度值，以倒角碎形路徑最佳，這是因為倒角碎形路徑其路徑的轉則點最多，當以銅環進行研光時，游離的鑽石磨料會因路徑變化，使得滾動的機會增加，造成銅環研光後的表面粗度值較好。
2. 銅環的轉速較高時，可使單位時間的加工量增大，但是轉速太高時會產生大量的摩擦熱，有時可能使研光面造成燒焦的現象，並且轉速太高時，將造成鑽石膏的飛散，使研光效果變差。
3. 研光的進給率較小時，銅環的重疊性較多，研光面較密集，可得到較佳之表面粗糙度。研光的進給率較大時，銅環重疊性較少，研光面不夠密集，所得到的表面粗糙度相對較差。
4. 因為本實驗是藉由鑽石膏在工件與銅環之間滾動，當預壓深度較大時，會改變鑽石膏在工件上的運動方式，也就是會由滾動的方式變成平移的方式，而造成刮切作用，如此不但無法得到良好的研光表面，反而會在工件表面上造成刮痕，而使研光面表面粗度變大。

六、結論

本研究以碎形磨拋路徑具有方向性分佈均勻的特色，發展出三種碎形路徑：(1) 口型碎形路徑 (2) 倒角型碎形路徑 (3) 圓弧型碎形路徑。在以帶柄砂輪進行磨拋之實驗中，顯示出圓弧型碎形路徑具有較佳之磨拋效果；而在銅環研光之實驗中，則以倒角型路徑較佳，因為帶柄砂輪與銅環兩者之磨拋機制並不相同，帶柄砂輪使用機制在於利用固定之磨料，對工件表面施以高速之磨削作用，使材料表面更加平滑，所以對於較圓滑之路徑可使磨削過程中，磨輪受力均勻，使磨拋面之表面粗度降低，而銅環的使用機制在於帶動鑽石磨料在工件與銅環之間滾動，所以三種碎形磨拋路徑中，倒角型路徑具有較多的轉折點，可使鑽石磨料在銅環與工件間的滾動情形增大，使磨拋面之表面粗度降低。碎形磨拋路徑在模具拋光的應用上，十分具有潛力，將來可由 Fuzzy 碎形路徑繼續發展出能模擬人工手動磨拋的動作，同時發展適合磨拋加工的 CAM 軟體，使自動磨拋更有效率。

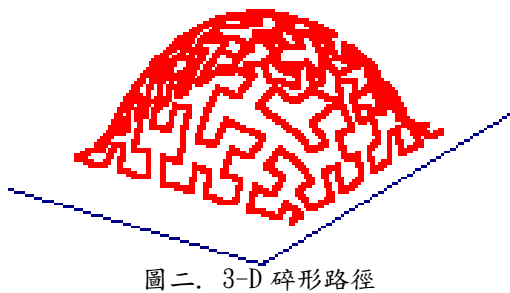
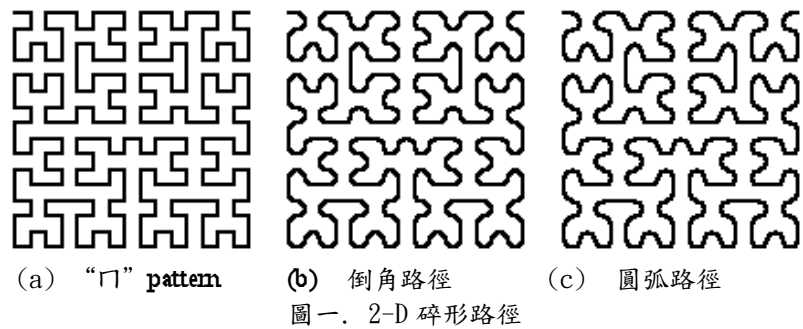
參考文獻

1. Benoit Mandelbrot, *Fractal Geometry of Nature*, 1970
2. Jorden J. Cox, and et. cl. "Space-filling curves in tool-path applications", *Computer-Aided Design* Volume 26, Number 3, March, 1994.
3. Yoshio Mizugaki, Masafumi Sukamoto, "Fractal Path Generation for a Metal-Mold Polishing Robot System and Its Evaluation by the Operability", *CIRP*, Vol. 41/1/1992.
4. 陳慶芳、陳昭彰、尹德宏、劉偉鈞，"三維曲面碎形刀具路徑與其加工面表面形貌之分析研究"，中國機械工程學會第十三屆全國學術研討會論文集，P.413~P420，民國八十五年十一月。
5. Chao-Chang A. Chen, and et. cl. "Generation of Fractal Tool Path for Automated Surface Finishing Process", *Proc. of the 5TH International Conference on Manufacturing, Australia, Aug18-21, 1998*.
6. 嚴文雄，廖學專，吳建興，陳昭彰，楊智旭"碎形磨拋路徑之產生及其磨拋加工特性之評估"中國機械工程學會第十五屆全國學術研討會論文集，P.365~370，民國八十七年十一月
7. Chao-Chang A. Chen and Nail A. Duffie, "Development of an automatic surface finishing system (ASFS) with in-process surface topography inspection", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 6 No4, pp. 427-430, 1996.
8. Chen, Y. T., Shin, Y. C. "Surface grinding process advisory system with fuzzy logic", *Control of Manufacturing Processes American Society of Mechanical Engineers, Dynamic System and Control Division (Publication) DSC v 28. Publ by ASME, New York, NY, USA. Pp 67-77*.
9. Nakajima, Toshikatsu; Tsukamoto, Shinya; Murakami, Daisuke; Kurata, Katsuhiko, "Fuzzy in-process control plunge grinding process (1st report)", *Journal of the Japan Society of Precision Engineering / Seimitsu Kogaku Kaishi* v58 n 2 Feb 1992 pp 313-318.
10. Nagasaka, Kazumori; Harada, Naohiko; Ichihashi, Hidetomo; Leonard, Raymond "Adaptive learning networks of multi-stage fuzzy production rules in expert system of grinding characteristics", *Computers & Industrial Engineering* v 27 n 1-4 Sep 1994. pp 433-436.
11. Nakajima, Toshikatsu; Tsukamoto, Shinya; Murakami, Daisuke; Yasuda, Hirohiko, "Neuro & fuzzy in-process control grinding techniques-study on intelligent automation of grinding process (3rd report)", *Seimitsu Kogaku Kaishi / Journal of the Japan Society for Precision Engineering* v 59 n 8 Aug 1993 pp 131-138.

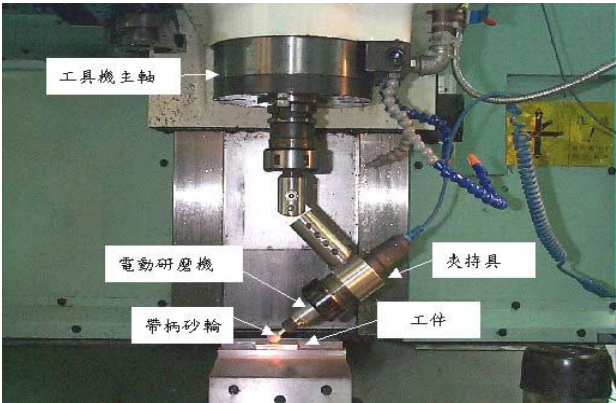
圖表

表一. 各種碎形及往復式路徑磨拋表面粗糙度值

	路徑長度	加工時間	Rmax(X)	Rmax(Y)	Rmax(U)	Rmax(T)
X-Y 往復式	1020.0 mm	12 分 44 秒	16.2 μ m	29.5 μ m	17.5 μ m	63.2 μ m
45 度往復式	442.0 mm	5 分 32 秒	39.2 μ m	39.3 μ m	4 μ m	82.5 μ m
X-往復式	510.0 mm	6 分 22 秒	3.6 μ m	44.1 μ m	36.5 μ m	84.2 μ m
┐-型碎形	478.1 mm	5 分 58 秒	26.1 μ m	32.2 μ m	25.4 μ m	83.7 μ m
倒角碎形	422.1 mm	5 分 18 秒	25.7 μ m	27.6 μ m	24.4 μ m	77.7 μ m
圓弧碎形	396.0 mm	4 分 54 秒	24.9 μ m	25.7 μ m	23.9 μ m	74.5 μ m



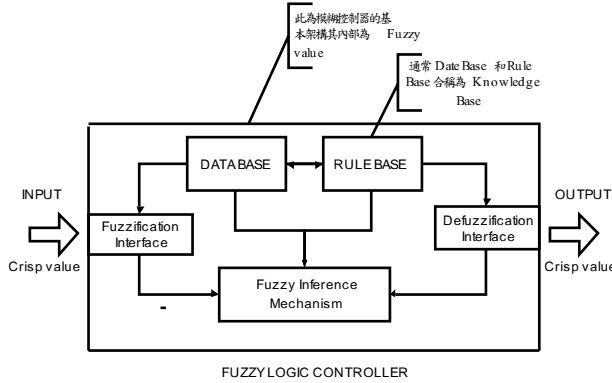
圖二. 3-D 碎形路徑



圖三. 自動磨拋系統



圖四. 3-D 碎形路徑實作



圖五 模糊控制器主要基本架構

表二 游離磨料實驗之直交配置

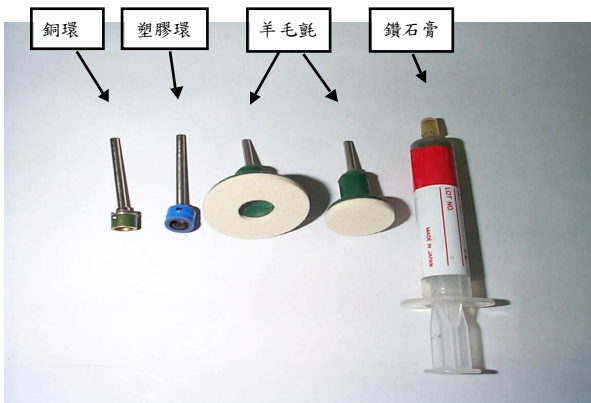
組別/行號	路徑 (3 階)	轉速 (rpm)	進給 (mm/min)	靜態預壓 (gw/cm^2)
1	ㄇ型	15000	30	200
2	ㄇ型	20000	80	500
3	ㄇ型	25000	130	800
4	倒角	15000	80	800
5	倒角	20000	130	200
6	倒角	25000	30	500
7	圓弧	15000	130	800
8	圓弧	20000	30	500
9	圓弧	25000	80	200

表三 田口法實驗結果

編號	Rmax(X) (μm)	Rmax(Y) (μm)	Rmax(U) (μm)	Rmax(T) (μm)	SN 比 η_1
1	1.69	1.39	1.40	4.48	-13.03
2	1.50	1.41	1.67	4.58	-13.22
3	1.12	1.34	1.66	4.12	-12.30
4	1.51	1.57	1.39	4.47	-13.01
5	1.90	1.97	1.75	5.62	-14.99
6	1.48	1.29	1.51	4.28	-12.63
7	1.39	1.96	1.15	4.50	-13.06
8	1.67	1.23	1.22	4.12	-12.30
9	1.80	1.20	1.41	4.41	-12.89

表四 各因素對粗糙度回應表

因素 水準	A (路徑)	B (轉速)	C (進給率)	D (靜態預壓)
1	-12.85	-13.03	-12.65	-13.64
2	-13.54	-13.5	-13.04	-12.97
3	-12.75	-12.6	-13.45	-12.54
合計	-39.14	-39.13	-39.14	-39.15



圖六 游離磨料磨拋工具



圖七 游離磨料碎形磨拋工件

